

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-005238

(43)Date of publication of application : 08.01.2003

(51)Int.Cl.

G02F 1/39

(21)Application number : 2001-187735

(71)Applicant : INST OF PHYSICAL & CHEMICAL  
RES

(22)Date of filing : 21.06.2001

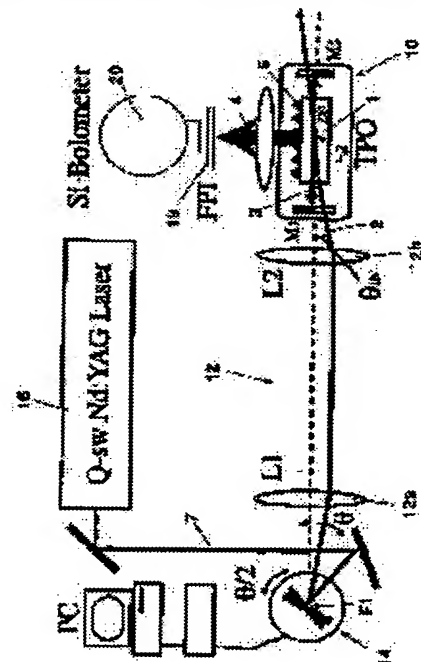
(72)Inventor : IMAI KAZUHIRO  
KAWASE AKIMICHI  
ITO HIROMASA

## (54) TERAHERTZ WAVE GENERATING DEVICE AND ITS HIGH-SPEED TUNING METHOD

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide a terahertz wave generating device that can easily carry out the frequency sweep of a terahertz wave and frequency tuning and at high speed in the generation of the terahertz wave by the parametric oscillation of a noncollinear phase matching condition in nonlinear optical crystal, and to provide its high-speed tuning method.

**SOLUTION:** The terahertz wave generating device is provided with a confocal optical system 12 to condense a light beam that passes a primary focus F1 on a secondary focus F2 positioned in the nonlinear optical crystal 1 and a beam deflecting element 14 capable of deflecting the optical axis of the light beam that passes the primary focus F1 at high speed. The laser beam 7 of a single frequency or a multimode is made incident as a pump wave 2 on the secondary focus F2 in the nonlinear optical crystal 1 through the beam deflecting element and the confocal optical system, an idler wave 3 and the terahertz wave 4 are generated in a direction where the noncollinear phase matching condition is satisfied, and the frequency of the generated terahertz wave 4 is tuned by deflecting the optical axis of the light beam by means of a beam deflecting element 14.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-5238

(P2003-5238A)

(43) 公開日 平成15年1月8日 (2003.1.8)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テラコート\* (参考)

G 0 2 F 1/39

G 0 2 F 1/39

2 K 0 0 2

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2001-187735(P2001-187735)

(22) 出願日 平成13年6月21日 (2001.6.21)

特許法第30条第1項適用申請有り 2001年3月28日~31日 社団法人応用物理学会開催の「2001年(平成13年)春季第48回応用物理学関係連合講演会」において文書をもって発表

(71) 出願人 000006792

理化学研究所

埼玉県和光市広沢2番1号

(72) 発明者 今井 一宏

宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399

理化学研究所 フォトダイナミクス研究センター内

(74) 代理人 100097515

弁理士 堀田 実

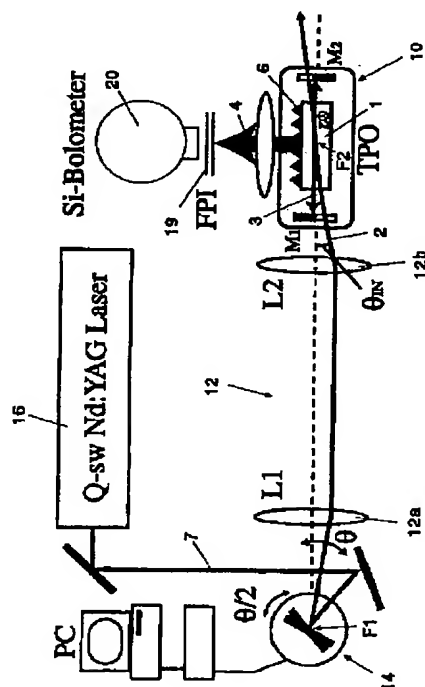
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 テラヘルツ波発生装置とその高速同調方法

(57) 【要約】

【課題】 非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック発振によるテラヘルツ波の発生において、テラヘルツ波の周波数掃引及び周波数同調を容易かつ高速に行うことができるテラヘルツ波発生装置とその高速同調方法を提供する。

【解決手段】 第1焦点F1を通過した光ビームを非線形光学結晶1内に位置する第2焦点F2に集光する共焦点光学系12と、第1焦点F1を通過する光ビームの光軸を高速で偏向可能なビーム偏向素子14とを備える。ビーム偏向素子と共焦点光学系を介して非線形光学結晶1内の第2焦点F2に向けて単一周波数またはマルチモードのレーザー光7をポンプ波2として入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波3とテラヘルツ波4を発生させ、かつビーム偏向素子14で光ビームの光軸を偏向して発生するテラヘルツ波4の周波数を同調させる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 パラメトリック効果によってテラヘルツ波発生が可能な非線形光学結晶(1)を有するテラヘルツ波パラメトリック発振器(10)と、第1焦点F1を通過した光ビームを前記非線形光学結晶内に位置する第2焦点F2に集光する共焦点光学系(12)と、前記第1焦点F1を通過する光ビームの光軸を高速で偏向可能なビーム偏向素子(14)と、前記ビーム偏向素子と共焦点光学系を介して第2焦点F2に向けてレーザー光(7)を入射するレーザー装置(16)と、を備えたことを特徴とするテラヘルツ波発生装置。

【請求項2】 前記テラヘルツ波パラメトリック発振器(10)は、非線形光学結晶(1)内で発生したアイドラー波(3)を結晶中で多重往復させて増幅する共振器(M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>)と、前記非線形光学結晶の表面に配置されたプリズム結合器(6)とを有する、ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波発生装置。

【請求項3】 前記共焦点光学系(12)は、焦点距離f1の第1凸レンズ系(12a)と焦点距離f2の第2凸レンズ系(12b)とからなり、第1凸レンズ系と第2凸レンズ系は互いにその焦点距離の和f1+f2の間隔を隔てて同軸上に位置し、これにより第1凸レンズ系と第2凸レンズ系がその中間位置にそれぞれの焦点位置を共有する、ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波発生装置。

【請求項4】 ビーム偏向素子(14)は、ガルバノ式光学スキャナまたは音響光学素子である、ことを特徴とする請求項1に記載のテラヘルツ波発生装置。

【請求項5】 第1焦点F1を通過した光ビームを非線形光学結晶(1)内に位置する第2焦点F2に集光する共焦点光学系(12)と、前記第1焦点F1を通過する光ビームの光軸を高速で偏向可能なビーム偏向素子(14)とを備え、

前記ビーム偏向素子と共焦点光学系を介して非線形光学結晶(1)内の第2焦点F2に向けてレーザー光(7)をポンプ波(2)として入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波(3)とテラヘルツ波(4)を発生させ、かつビーム偏向素子(14)で光ビームの光軸を偏向して発生するテラヘルツ波(4)の周波数を同調させる、ことを特徴とするテラヘルツ波の高速同調方法。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、テラヘルツ波発生装置とその高速同調方法に関する。

【0002】

【従来の技術】周波数範囲が約1~3THzである遠赤外線あるいはサブミリ波の領域は、光波と電波の境界に位置しており、光波と電波がそれぞれの領域で発展してきたのとは対比的に、技術面及び応用面の両面で未開拓

の分野として取り残されていた。しかし、無線通信におけるこの周波数帯(約1~3THz)の有効利用や超高速通信への対応、およびこの周波数帯の電磁波の特徴を生かしたイメージングやトモグラフィーによる環境計測、そして生物や医学への応用など、この領域は近年ますます重要となってきた。以下、この周波数帯(約1~3THz)の遠赤外線及びサブミリ波を「テラヘルツ波」と呼ぶ。

【0003】テラヘルツ波は発生・検出ともに困難であり、従来は、(A)自由電子レーザー、(B)後進波管、(C)p-Geレーザー、等の手段によりテラヘルツ波を発生させていた。自由電子レーザーは、原理的に任意の波長のテラヘルツ波を発生可能であるが、1THz付近での発振には光波帯よりもはるかに長い電子バンチが必要となり、10メートル規模の大型装置となり、高価であるばかりか使用に際し不便である問題点があった。後進波管(BWO: Backward Oscillator)は、スペクトル純度に優れ、数百GHz帯では有用であるが、1THzより高周波側で波長可変性が急減する問題点があった。p-Geレーザーは、液体ヘリウムで冷却が必要な極低温を要するため、その設備が大型となり、使用上不便であった。

【0004】従って、従来のテラヘルツ波発生手段は、いずれも実験室レベルでは一部使用可能であるが、大型かつ高価であり、或いは使用上の不便が多く、多種多様な応用研究のニーズを満たすほど実用的かつ簡便ではなかった。

【0005】上述した従来のテラヘルツ波発生手段に対して、1~2THz帯で波長可変であり、かつ小型レーザー装置で作動可能な常温動作のテラヘルツ波発生手段が、本発明の発明者等によって以下の参考資料に報告されている。

【0006】(参考資料1)特開平9-146131号公報

(参考資料2) Unidirectional radiation of widely tunable THz wave using a prism coupler under noncollinear phase matching condition, 1997 American Institute of Physics, 11 August 1997

(参考資料3)「パラメトリック発振による波長可変テラヘルツ電磁波の発生と応用」、レーザー研究、1998年7月

(参考資料4) MgO:LiNbO<sub>3</sub>を用いたTHz波パラメトリック特性の検討」、電子情報通信学会誌文誌、2000年4月

【0007】図7は、このテラヘルツ波の発生原理図である。この図において、1は非線形光学結晶(例えばLiNbO<sub>3</sub>)、2はポンプ波(例えばYAGレーザー

光)、3はアイドラー波、4はテラヘルツ波である。ラマン活性かつ遠赤外活性を有する非線形光学結晶1にポンプ波2を一定方向に入射すると、誘導ラマン効果(又はパラメトリック相互作用)により物質の素励起波(ポラリトン)を介してアイドラー波3とテラヘルツ波4が発生する。この場合、ポンプ波2( $\omega_p$ )、テラヘルツ波4( $\omega_t$ )、アイドラー波3( $\omega_i$ )の間には、式

(1)で示すエネルギー保存則と式(2)で示す運動量保存則(位相整合条件)が成り立つ。なお、式(2)はベクトルであり、ノンコリニアな位相整合条件は、図7

【0008】

$$\omega_p = \omega_t + \omega_i \dots (1)$$

$$\kappa_p = \kappa_t + \kappa_i \dots (2)$$

【0009】このとき発生するアイドラー波3とテラヘルツ波4は空間的な広がりを持ち、その出射角度に応じてそれらの波長は連続的に変化する。このシングルバス配置におけるブロードなアイドラー波及びテラヘルツ波の発生をTPG(THz-wave Parametric Generation)と呼ぶ。なお、基本的な光パラメトリック過程は、1個のポンプ光子の消滅と、1個のアイドラ光子および1個のシグナル光子の同時生成によって定義される。アイドラ光あるいはシグナル光が共振する場合、ポンプ光強度が一定のしきい値を超えるとパラメトリック発振が生じる。また、1個のポンプ光子の消滅と、1個のアイドラ光子および1個のポラリトンの同時生成が誘導ラマン散乱であり、広義のパラメトリック相互作用に含まれる。

【0010】しかし、図7に示したシングルバス配置のテラヘルツ波発生装置で発生したテラヘルツ波は非常に微弱であり、しかもその大部分は、非線形光学結晶中を数百 $\mu\text{m}$ 進む間に吸収されてしまうという問題があった。

【0011】図8はこの問題を解決したテラヘルツ波発生装置の構成図である。この図に示すように、上述したブロードなアイドラー波3に対して特定方向(角度 $\theta$ )に共振器を構成することで、特定方向のアイドラー波3の強度を高めることができる。この場合、共振器は高反射コーティングを施したミラー $M_1$ と $M_2$ からなり、回転ステージ5上にセットされ、共振器の角度を微調整することができる。また、2枚のミラー $M_1$ 、 $M_2$ はその半分のみに高反射コーティングを施し、残りは素通しでポンプ波2が通過するようになっている。なお、図8で6はテラヘルツ波4を外部的に取り出すためのプリズム結合器である。

【0012】図8に示したテラヘルツ波発生装置において、ポンプ波の結晶への入射角 $\theta$ をある範囲(例えば $1 \sim 2^\circ$ )で変え、結晶中でのポンプ波とアイドラ波のなす角が変化し、テラヘルツ波とアイドラ波のなす角も変化する。この位相整合条件の変化により、テラヘ

ルツ波は例えば約 $140 \sim 310 \mu\text{m}$ の間で連続波長可変性を備える。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】上述したように、従来のテラヘルツ波発生装置では、非線形光学結晶1と2枚の鏡 $M_1$ 、 $M_2$ で構成されたアイドラ光共振器を回転ステージ5上に載せて全体を回転させ、これによりポンプ波(励起光ビーム)2とアイドラー波3のなす角を変化させ、テラヘルツ波およびアイドラ波の発振周波数を変えていた。

【0014】しかしかかる発振周波数の同調手段は、共振器を回転させる回転ステージ5の駆動機構が複雑となり、かつ共振器自体の調整が煩雑である問題点があった。また、平均的な非線形光学結晶( $\text{LiNbO}_3$ )の長さは例えば約60mmであり、反射鏡や反射鏡ホルダーを回転ステージ5の上に配置すると長さは約20cm以上になる。さらに共振器を安定するには共振器の剛性を高める必要があり重量も増える。その結果、共振器全体の回転体としてのイナーシャが増加し、高速にその回転角を変えることは困難であった。そのため、従来のテラヘルツ波パラメトリック発振器の周波数掃引は低速であり、任意波長への瞬時周波数同調は不可能であった。

【0015】本発明は、かかる問題点を解決するために創案されたものである。すなわち本発明の目的は、非線形光学結晶中のノンコリニア位相整合条件のパラメトリック発振によるテラヘルツ波の発生において、テラヘルツ波の周波数掃引及び周波数同調を容易かつ高速に行うことができるテラヘルツ波発生装置とその高速同調方法を提供することにある。

【0016】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、パラメトリック効果によってテラヘルツ波発生が可能な非線形光学結晶(1)を有するテラヘルツ波パラメトリック発振器(10)と、第1焦点F1を通過した光ビームを前記非線形光学結晶内に位置する第2焦点F2に集光する共焦点光学系(12)と、前記第1焦点F1を通過する光ビームの光軸を高速で偏向可能なビーム偏向素子(14)と、前記ビーム偏向素子と共焦点光学系を介して第2焦点F2に向けてレーザー光(7)を入射するレーザー装置(16)と、を備えたことを特徴とするテラヘルツ波発生装置が提供される。

【0017】また本発明によれば、第1焦点F1を通過した光ビームを非線形光学結晶(1)内に位置する第2焦点F2に集光する共焦点光学系(12)と、前記第1焦点F1を通過する光ビームの光軸を高速で偏向可能なビーム偏向素子(14)とを備え、前記ビーム偏向素子と共焦点光学系を介して非線形光学結晶(1)内の第2焦点F2に向けてレーザー光(7)をポンプ波(2)として入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波(3)とテラヘルツ波(4)を発生させ、

10

20

30

40

50

かつビーム偏向素子(14)で光ビームの光軸を偏向して発生するテラヘルツ波(4)の周波数を同調させる、ことを特徴とするテラヘルツ波の高速同調方法が提供される。

【0018】上記本発明の装置及び方法によれば、光ビームとしてレーザー光(7)をポンプ波(2)として入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波(3)とテラヘルツ波(4)を発生させ、かつビーム偏向素子(14)で光ビームの光軸を偏向して発生するテラヘルツ波(4)の周波数を同調させることができる。従って、このビーム偏向素子(14)として1kHz以上に応答可能な素子(例えばガルバノ式光学スキャナまたは音響光学素子)を用いることにより、テラヘルツ波の周波数掃引及び任意周波数への同調を容易かつ高速に行うことができる。

【0019】本発明の好ましい実施形態によれば、前記テラヘルツ波パラメトリック発振器(10)は、非線形光学結晶(1)内で発生したアイドラー波(3)を結晶中で多重往復させて増幅する共振器( $M_1$ ,  $M_2$ )と、前記非線形光学結晶の表面に配置されたプリズム結合器(6)とを有する。この構成により、アイドラー波(3)を増幅して発生するテラヘルツ波(4)の強度を高め、かつ、プリズム結合器(6)によりテラヘルツ波の発生方向を一定化し、テラヘルツ波を適用する計測システムの調整を簡潔にすることができる。

【0020】また前記共焦点光学系(12)は、焦点距離 $f_1$ の第1凸レンズ系(12a)と焦点距離 $f_2$ の第2凸レンズ系(12b)とからなり、第1凸レンズ系と第2凸レンズ系は互いにその焦点距離の和 $f_1 + f_2$ の間隔を隔てて同軸上に位置し、これにより第1凸レンズ系と第2凸レンズ系がその中間位置にそれぞれの焦点位置を共有する。この構成により、ビーム偏向素子(14)で光ビームの光軸を偏向しても、その光ビームを非線形光学結晶内に位置する第2焦点 $F_2$ に集光することができる。

【0021】更にビーム偏向素子(14)は、ガルバノ式光学スキャナまたは音響光学素子である、ことが好ましい。かかるビーム偏向素子(14)を用いることにより、1kHz以上の応答速度で、テラヘルツ波の周波数掃引及び周波数同調を容易かつ高速に行うことができる。

【0022】

【発明の実施の形態】以下に本発明の好ましい実施形態を図面を参照して説明する。なお、各図において、共通する部分には同一の符号を付し重複した説明を省略する。

【0023】図1は、本発明によるテラヘルツ波発生装置の全体構成図である。この図に示すように本発明のテラヘルツ波発生装置は、テラヘルツ波パラメトリック発振器10、共焦点光学系12、ビーム偏向素子14および

びレーザー装置16を備える。

【0024】テラヘルツ波パラメトリック発振器10(TPO)は、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶のノンコリニア位相整合を利用したテラヘルツ光源であり、パラメトリック効果によってテラヘルツ波発生が可能な非線形光学結晶1と、非線形光学結晶1内で発生したアイドラー波3を結晶中で多重往復させて増幅する共振器(ミラー $M_1$ ,  $M_2$ からなる)と、非線形光学結晶1の表面(図で上面)に配置されたプリズム結合器6とを有する。非線形光学結晶1は、パラメトリック発振可能な結晶であり、例えば、 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ( $\text{MgO}$ ドープ $\text{LiNbO}_3$ )を用いることができる。その他の非線形光学結晶1としては、 $\text{LiTaO}_3$ 、 $\text{Nd}$ ドープ $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{Nd}$ ドープ $\text{LiTaO}_3$ 、等を用いてもよい。

【0025】共焦点光学系(12)は、図2(B)に示すように、焦点距離 $f_1$ の第1凸レンズ系12aと焦点距離 $f_2$ の第2凸レンズ系12bとからなる。第1凸レンズ系12aと第2凸レンズ系12bはそれぞれ1枚または複数のレンズで構成される。また第1凸レンズ系12aと第2凸レンズ系12bは互いにその焦点距離の和 $f_1 + f_2$ の間隔 $L$ を隔てて同軸上に位置する。従って、第1凸レンズ系12aと第2凸レンズ系12bはその中間位置Aにそれぞれの焦点位置を共有する。この構成により、第1焦点 $F_1$ を通過した光ビームを第2焦点 $F_2$ に集光することができる。

【0026】ビーム偏向素子14は、ガルバノ式光学スキャナまたは音響光学素子である。ガルバノ式光学スキャナは、ガルバノスキャナに設置された反射ミラーであり、反射ミラーの回転角を電圧により制御することができる。例えば、ハーモニックドライブシステムズ社製のLSA-20A-30を用いた場合、回転角 $\pm 3^\circ$ を電圧により制御することができ、その直線性は $\pm 0.06\%$ 以下、応答速度は約1kHzに達する。従って反射ミラーの反射面の角度を機械的に変えることによって、ビームに対して反射面内の1点を中心とする出射方向に回転を与えることができる。

【0027】また、音響光学素子には、音響光学素子(音響光学偏向器、音響光学変調器)などが含まれる。音響光学素子は音響光学結晶を進行する音波によって生ずる屈折率の縞により光波が回折されることを利用したもので、音響波の周波数によって回折角を変えることができる。音響光学素子は可動部分が全くなく、高速かつ信頼性が高い特徴がある。例えば、オプトサイエンス社から偏向角度約 $3^\circ$ 以上、アクセス時間約 $5\mu\text{sec}$ 以下のAO偏向器が市販されている。これらのビーム偏向素子14により、図2の第1焦点 $F_1$ を通過する光ビームの光軸を高速で偏向させることができる。なお偏向のしかたは、ガルバノ式光学スキャナでは図1に例示するように反射であり、AO偏向器では透過となる。

【0028】図1において、レーザー装置16は、ビー

10

20

30

40

50

ム偏向素子14と共焦点光学系12を介して非線形光学結晶1内に位置する第2焦点F2に向けて単一周波数のレーザー光7を入射する。

【0029】本発明のテラヘルツ波発生装置では、図1に示すように、ビーム偏向素子14、共焦点光学系12、テラヘルツ波パラメトリック発振器10の順に配置する。

【0030】図2は本発明の原理図である。この図において、(A)は焦点距離f1と焦点距離f2が同一の場合、(B)はこれが異なる場合である。以下これらの図を用いて本発明の原理図を説明する。

【0031】図2(A)のように、焦点距離fのレンズ2枚を反射点F1からf、2f、fの間隔に配置した場合を考える。r<sub>in</sub>を入射点、r<sub>out</sub>を出射点とする光線行列を光エレクトロニクス基礎(A. Y a r i v著)に従って計算する。2枚のレンズが焦点を共有する一点鎖線の位置Aで前半と後半に分ける。前半部分の光線行列は[数1]の式(1)で得られる。また後半の光学系は前半と全く同じなのでr<sub>in</sub>からr<sub>out</sub>までの光線行列は[数1]の式(2)で表される。更にr<sub>in</sub>、r'<sub>in</sub>をそれぞれの入射面での光線の位置と傾き、r<sub>out</sub>、r'<sub>out</sub>をそれぞれ入射点での光線の位置、傾きとすると、[数1]の式(3)が得られ、r<sub>out</sub>面上でのポンプビームの位置と入射角は、r<sub>in</sub>面を出発するポンプビームの位置と傾きによって決定される。

【0032】

[数1]

$$\begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & f \\ -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{in} \\ -r'_{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

【0033】反射点r<sub>in</sub>をミラーの回転中心において不動点にすれば、r<sub>out</sub>も不動である。単純にするため反射点をr<sub>in</sub>=0として反射点を中心にミラーを回転してビームに角度変化を与えると考えると、r<sub>out</sub>=r<sub>in</sub>=0、r'<sub>out</sub>=-r'<sub>in</sub>が得られることから、ポンプ光入射角はr<sub>out</sub>=0の一点を中心に、スキャナで与えた角度に等しい角度で回転する。

【0034】2枚のレンズの焦点距離が異なる一般的な場合にも、1点を中心にビームの回転を与えることができるが、入射角が焦点距離の比率に応じて拡大・縮小される。この場合、図2(B)のように、1枚目レンズの焦点距離をf1、2枚目レンズの焦点距離をf2として

焦点を共有するようにf1+f2の間隔で配置する。f<sub>in</sub>を入射点、f<sub>out</sub>を出射点とし、2枚のレンズが焦点を共有する1点鎖線の位置Aで前半と後半に分ける。

【0035】前半部分の光線行列は[数2]の式(4)で得られる。後半の光学系も同様に計算すると[数2]の式(5)が得られる。従ってr<sub>in</sub>からr<sub>out</sub>までの光線行列は[数2]の式(6)で表される。r<sub>in</sub>、r'<sub>in</sub>をそれぞれ入射面での光線の位置と傾き、r<sub>out</sub>、r'<sub>out</sub>をそれぞれ入射点での光線の位置と傾きとすると、[数2]の式(7)が得られる。

【0036】

[数2]

$$\begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f_1 \\ -\frac{1}{f_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & f_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & f_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & f_1 \\ -\frac{1}{f_1} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f_2}{f_1} & 0 \\ 0 & -\frac{f_1}{f_2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f_2}{f_1} & 0 \\ 0 & -\frac{f_1}{f_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f_2}{f_1} r_{in} \\ -\frac{f_1}{f_2} r'_{in} \end{bmatrix} \quad (7)$$

【0037】反射点r<sub>in</sub>をミラーの回転中心において不動点にすれば、r<sub>out</sub>=-(f<sub>2</sub>/f<sub>1</sub>)・r<sub>in</sub>も不動である。ただし、r<sub>out</sub>=-(f<sub>2</sub>/f<sub>1</sub>)・r<sub>in</sub>は、r<sub>out</sub>面の像が-(f<sub>2</sub>/f<sub>1</sub>)倍に拡大・縮小されることを意味しており、ビームのサイズの拡大・縮小を伴う。またr<sub>out</sub>面の入射角r'<sub>out</sub>はr<sub>in</sub>面の出射角のf<sub>1</sub>/f<sub>2</sub>倍に拡大・縮小される。

【0038】上述した装置を用い本発明のテラヘルツ波発生装置の高速同調方法では、ビーム偏向素子14と共焦点光学系12を介して非線形光学結晶1内の第2焦点F2に向けて単一周波数またはマルチモードのレーザー光7をポンプ波2として入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波3とテラヘルツ波4を発生させ、かつビーム偏向素子14で光ビームの光軸を偏向して発生するテラヘルツ波4の周波数を同調させる。

【0039】上述した本発明の装置及び方法によれば、光ビームとして単一周波数またはマルチモードのレーザー光7をポンプ波2として入射し、ノンコリニア位相整合条件を満たす方向にアイドラー波3とテラヘルツ波4を発生させ、かつビーム偏向素子14で光ビームの光軸を偏向して発生するテラヘルツ波4の周波数を同調させることができる。従って、このビーム偏向素子14とし

て1kHz以上に応答可能な素子（例えばガルバノ式光学スキャナまたは音響光学素子）を用いることにより、テラヘルツ波の周波数掃引及び任意周波数への同調を容易かつ高速に行うことができる。

【0040】

【実施例】以下、本発明の実施例を説明する。図1に示した装置において、テラヘルツ波パラメトリック発振器10（TPO）を長さ50mmのLiNbO<sub>3</sub>結晶と2枚の反射鏡M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>（R>99%、R=40%）から構成した。また励起光源すなわちレーザー装置16として、Q-switch Nd:YAGレーザー（波長1.064μm、パルス幅25ns、50Hz、40mJ/pulse）を用いた。更に共焦点光学系12として、焦点距離f=200mmのレンズを2枚、2fの間隔で配置した共焦点光学系を採用し、光学スキャナ14によって与えられるビーム振れ角をLiNbO<sub>3</sub>結晶内の1点を中心とするポンプ光の入射角に対応させた。

【0041】図3～図6は、本発明のテラヘルツ波発生装置の試験結果である。図3は、本発明のテラヘルツ波発生装置の同調特性である。この図において横軸は非線形光学結晶1に対する入射角θ<sub>i</sub>、縦軸は発生したテラヘルツ波の周波数である。また図中の直線は理論値、黒丸は実測値である。この図から入射角を変化させるだけで、テラヘルツ波の周波数を理論値通りに正確に同調させることができることがわかる。

【0042】図4は、本発明のテラヘルツ波発生装置の出力特性である。この図において横軸はテラヘルツ波の周波数、縦軸はテラヘルツ波とアイドラー波のパルス出力である。この図から周波数可変範囲1～2THzにおいて、最大出力150pJ/pulseのテラヘルツ波が得られた。なお非線形光学結晶1としてMgO:LiNbO<sub>3</sub>を用いれば周波数可変範囲は2.6THzまで拡大する。

【0043】図5は、本発明のテラヘルツ波発生装置によるテラヘルツ波の波長測定結果である。この図において横軸は図1のメタルメッシュエタロン19の間隔拡大量、縦軸はエタロンを通過したテラヘルツ波の出力である。また図中の実線は非線形光学結晶1に対する入射角θ<sub>i</sub>が1.73°の場合、破線は1.49°の場合である。この図から、入射角θ<sub>i</sub>が1.73°の場合には波長167μmのテラヘルツ波が発生し、入射角θ<sub>i</sub>が1.49°の場合には波長193μmのテラヘルツ波が発生することがわかる。

【0044】図6は、本発明の高速同調方法によるテラヘルツ波のスイッチング特性である。この図において、横軸は時間、縦軸は図5における間隔拡大量が49μmに固定されたエタロンを通過したテラヘルツ波の出力である。また(a)は入射角θ<sub>i</sub>が1.73°の場合、(b)は入射角θ<sub>i</sub>が1.49°の場合、(c)は1.73°と1.49°を25Hzでスイッチングした場合である。こ

の図から、25Hzに追従して、1パルス毎に発振波長がスイッチングしていることがわかる。

【0045】上述したように、位相整合条件をポンプ光入射角によって変化させるため、共振器を機械的に回転せずにTHz波の波長選択が可能である。すなわち光学式スキャナドライバへの制御電圧を変えることによって150μm-290μmまでの波長可変性が得られることを確認した。

【0046】なお、本発明は上述した実施形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々変更できることは勿論である。

【0047】

【発明の効果】上述したように、本発明は、ガルバノスキャナもしくは音響光学素子と共焦点光学系を用いた励起光源ビームの入射角回転によるテラヘルツ波パラメトリック発振器の新しい周波数同調手段であり、周波数掃引が高速、任意周波数への高速同調が可能、という特徴を持つ。すなわち、従来のテラヘルツ波発振器では不可能であった高速周波数掃引および任意周波数への高速同調を可能にする効果を有する。言い換えれば、本発明の方法および装置により、（1）テラヘルツ波パラメトリック発振器を回転せずに同調可能であり、（2）周波数同調が高速であり、（3）連続的周波数掃引が高速であり、（4）大きく離れた任意周波数への高速同調も可能である。

【0048】従って、本発明の方法および装置は以下の応用が可能である。

（1）分光測定の高速化

テラヘルツ波帯に吸収線を持つガスの分光では、テラヘルツ波はガス中を伝搬した後検出される。テラヘルツ波周波数掃引し、ガスに特異的な吸収線の周波数、線幅、吸収量などの情報が得られる。ガスの種々の特定、濃度、温度等の情報が引き出せる。周波数掃引が高速なことは、分光測定の高速化をもたらす。

（2）高感度ガス検出

測定対象となるガスの吸収線に一致した周波数と透過となる周波数を交互に発振させ、2つの周波数に対する透過光強度の差を検出する差分検出法は、背景雑音が相殺されるため検出感度を高めることができる。レーザー光を用いた分光ではしばしば用いられている手法である。テラヘルツ波帯では、任意周波数へ高速に同調できる光源が無かったため困難であったが、本発明の同調方法によりあらゆるガス種に対応した差分検出法が高速に行える。

（3）ガス濃度の実時間計測

任意周波数への同調速度が、ガルバノスキャナの場合1ミリ秒、音響光学素子の場合1マイクロ秒程度であるため、実時間でガス濃度を検出することができる。

【0049】従って、本発明のテラヘルツ波発生装置とその高速同調方法は、非線形光学結晶中のノンコリニア



位相整合条件のパラメトリック発振によるテラヘルツ波の発生において、テラヘルツ波の周波数掃引及び周波数同調を容易かつ高速に行うことができる、等の優れた効果を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明によるテラヘルツ波発生装置の全体構成図である。

【図2】本発明の原理図である。

【図3】本発明のテラヘルツ波発生装置の同調特性である。

【図4】本発明のテラヘルツ波発生装置の出力特性である。

【図5】本発明のテラヘルツ波発生装置によるテラヘルツ波の波長測定結果である。

\*

\*【図6】本発明の高速同調方法によるテラヘルツ波のスイッチング特性である。

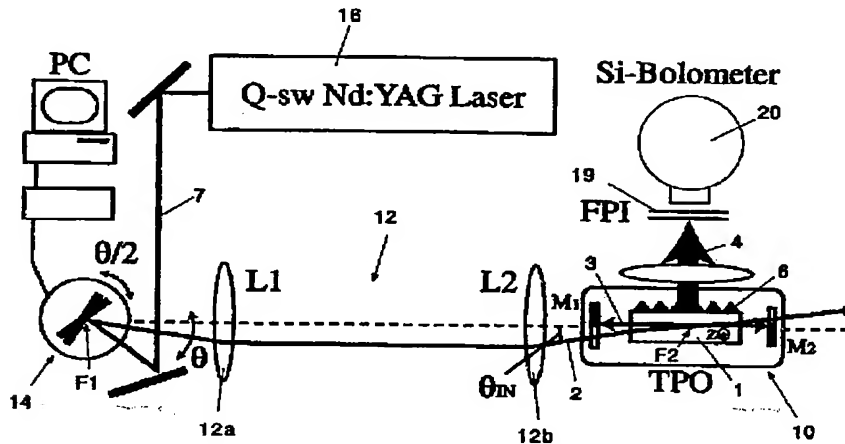
【図7】テラヘルツ波の発生原理図である。

【図8】共振器を有する従来のテラヘルツ波発生装置の構成図である。

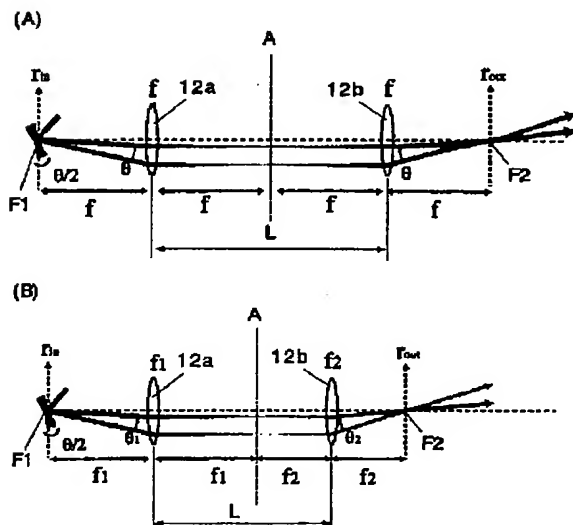
【符号の説明】

- 1 非線形光学結晶、2 ポンプ波、3 アイドラー波、4 テラヘルツ波、5 回転ステージ、6 プリズム結合器、7 レーザー光、10 テラヘルツ波パラメトリック発振器、12 共焦点光学系、12a 第1凸レンズ系、12b 第2凸レンズ系、14 ビーム偏向素子、16 レーザー装置、19 メタルメッシュエタロン、20 ボロメーター、

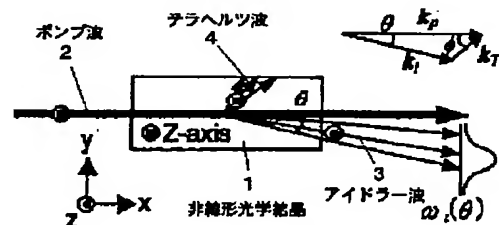
【図1】



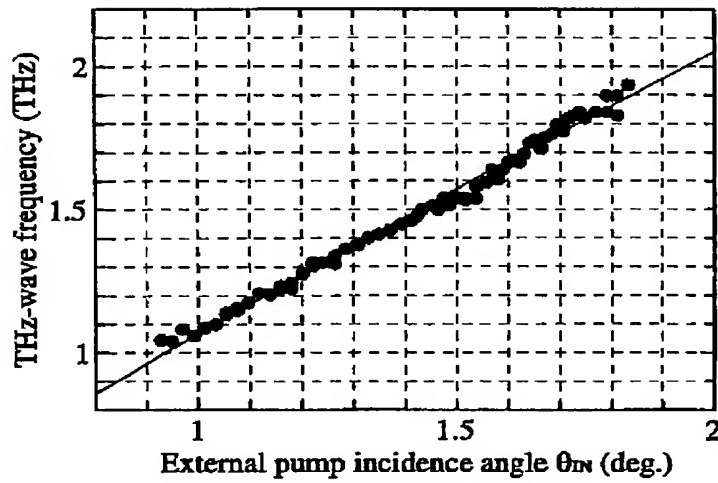
【図2】



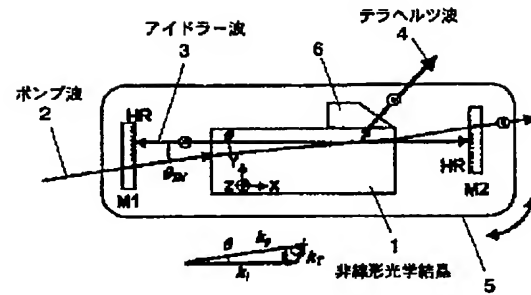
【図7】



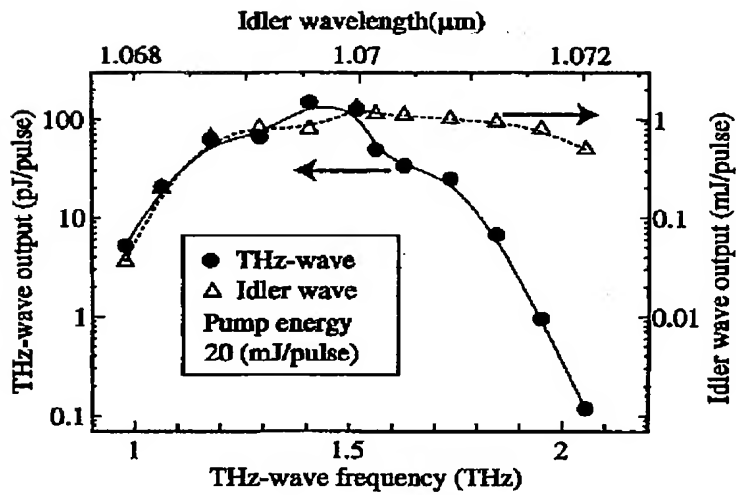
【図3】



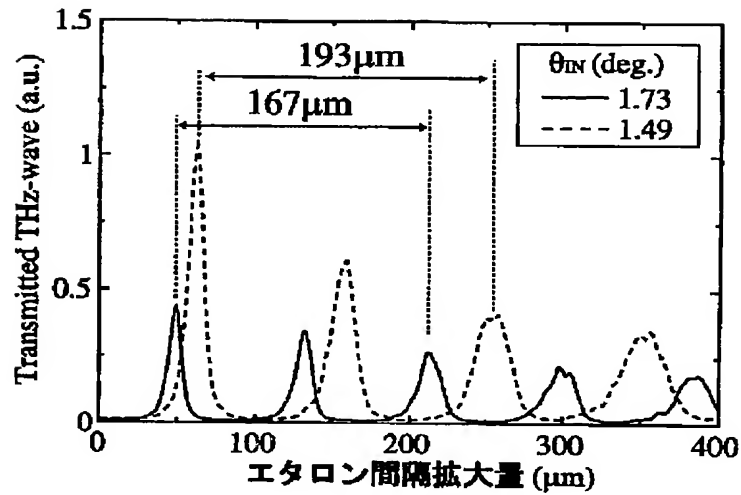
【図8】



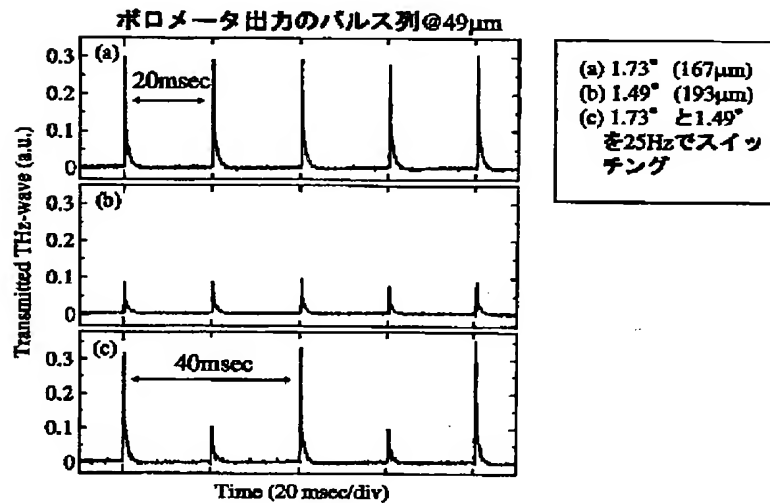
【図4】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(72)発明者 川瀬 晃道  
宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399  
理化学研究所 フォトダイナミクス研究  
センター内

(72)発明者 伊藤 弘昌  
宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399  
理化学研究所 フォトダイナミクス研究  
センター内  
Fターム(参考) 2K002 AA02 AA04 AA07 AB12 BA02  
BA12 CA03 DA01 GA04 HA21